

张震,刘广亮,田步万,等. 吴起县归一化植被指数时空变化趋势及对气候变化的响应[J]. 陕西气象,2025(1):66-70.

文章编号:1006-4354(2025)01-0066-05

# 吴起县归一化植被指数时空变化趋势 及对气候变化的响应

张震<sup>1</sup>,刘广亮<sup>1</sup>,田步万<sup>1</sup>,马龙龙<sup>2,3</sup>,赵国平<sup>4</sup>,胡振宏<sup>2,3,5</sup>

(1. 吴起县退耕还林生态(森林)公园管理处,陕西吴起 717600;

2. 西北农林科技大学资源环境学院农业农村部西北旱地农业绿色低碳重点实验室,陕西杨凌 712100;

3. 西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西杨凌 712100;

4. 陕西省林业科学院黄土高原水土保持与生态修复国家林业和草原局重点实验室,西安 710000;

5. 中国气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点开放实验室,西安 710014)

**摘要:**利用 MODIS 的归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)数据和气候数据,分析陕西省吴起县 2001—2020 年间植被覆盖的时空变化趋势及其对气候变化的响应。研究表明:吴起县 2001—2020 年间植被的 NDVI 年际变化整体以 0.059/10 a 的速率显著增加。在区域尺度上,吴起县植被的 NDVI 空间分布自东南或南部向西北方向递减,并受到土地利用类型和气候变化等因素的影响。森林的 NDVI 增加速率明显大于农田。在空间分布上,西部地区植被 NDVI 与气温呈正相关,而东北和南部地区则呈负相关。整个区域的 NDVI 与降水量及标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)均显示出正相关性,表明区域植被 NDVI 易受干旱的影响。此外,森林对降水和 SPEI 的敏感性低于农田。

**关键词:**NDVI;干旱;吴起县;退耕还林;气候变化

**中图分类号:**P461.7

**文献标识码:**A

陕西省吴起县位于黄土高原北部的农牧交错带,受过度放牧、森林砍伐等人类活动的影响,发生了严重的植被退化、水土流失、土壤侵蚀等生态环境问题,是中国水土流失最为严重、生态环境最为脆弱的地区之一<sup>[1-2]</sup>。为了改善生态环境,1998 年以来,该县积极响应国家号召实施退耕还林还草政策,实行封山禁牧,确立了“封山退耕、植树种草、舍饲养羊、林牧主导、强农富民”的发展战略<sup>[3-6]</sup>,极大地改善了吴起县的自然生态环境。截止 2021 年底全县共完成退耕面积 16.33 万  $\text{hm}^2$ ,林草覆盖率已由 1997 年的 19.2% 提高到目前的

72.9%,土壤年侵蚀模数由 1997 年的 1.53 万  $\text{t}/\text{km}^2$  下降到目前的 0.5 万  $\text{t}/\text{km}^2$  以下。经过近 20 年的生态治理全县林草覆盖率大幅提高,水土流失全面下降,生物多样性不断丰富,生态恢复效果得到很大的提升<sup>[7-9]</sup>。然而,受制于该地区自然条件以及前期植树造林和退耕还林项目在树种选择和配置等方面存在的缺陷<sup>[10-13]</sup>,恢复植被存在林分结构单一、林分密度过高以及林木生长发育缓慢等问题<sup>[11-13]</sup>。区域人工林生态系统已经出现衰退现象,包括生长减缓、冠层枯萎甚至整株死亡<sup>[13-14]</sup>,这导致人工林生态系统结构和功能显著

**收稿日期:**2023-11-20

**作者简介:**张震(1989—),男,陕西吴起人,汉族,学士,高级工程师,从事林业工作。

**通信作者:**胡振宏(1987—),男,湖北监利人,汉族,博士,教授,从事全球变化生态学研究。

**基金项目:**秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2021K-7);国家重点研发计划(2024YFF1308600);中央高校基本科研业务费专项资金(2452022336)。

低于相同林地条件下相同林分平均水平<sup>[11,14]</sup>。高耗水的树种和高密度的造林方式可能会加剧土壤水分的过度消耗,导致一些区域出现土壤干层的现象<sup>[14-15]</sup>。此外,区域气候呈现暖干化的趋势<sup>[16-19]</sup>,这加剧了区域生态系统干旱胁迫。虽然近年来对黄土高原植被与气候响应的研究增多<sup>[10,16,20]</sup>,然而宏观层面的植被活动与气候变化的空间非平稳关系及其响应格局并不能解释小尺度的变化特征。吴起县作为我国退耕还林第一县,其植被时空变化趋势及其对气候变化的响应目前尚没有清晰的认识。基于此,本研究基于卫星遥感的归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)和气候数据,分析吴起县2001—2020植被NDVI的时空变化趋势及其对气候变化的响应,从而为吴起县今后植被变化、环境监测及生态工程建设提供科学参考。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

吴起县(107°39′~108°33′E, 36°33.5′~37°24.5′N)地处陕西省延安市西北部,海拔1233~1809 m,总面积约3791.5 km<sup>2</sup>。全县地势以山川脊梁为主,属于黄土高原典型的丘陵地带。吴起县地处暖温带,属半干旱气候。多年平均气温为8.18℃(1970—2020年均值),多年平均降水量为455.8 mm,且主要集中在7—9月。土壤多为黄绵土,土层深厚,易被侵蚀。自退耕还林还草等工程实施以来,当地逐渐形成了以刺槐、杜梨、柠条、沙棘以及赖草等乔灌木为主的人工林地。

### 1.2 数据来源及处理

1.2.1 NDVI数据 2001—2020年植被的NDVI数据来自美国国家航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发布的MOD13Q1(<https://earthdata.nasa.gov/>),该数据时间分辨率为16 d,空间分辨率为500 m。使用MRT(MODIS reprojection tool)工具进行影像数据的镶嵌、地图投影转换和裁剪等预处理,并通过均值法计算年NDVI。

1.2.2 气象数据 气温和降水数据来自中国气象数据共享网(<http://data.cma.cn>),选取了吴起站1970—2020年的降水和气温数据量化气候

变化特征。标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)是基于降水和气温数据计算潜在蒸散量后,得到每月水平衡,对降水量和蒸散量之间的差值序列累积概率值进行正态标准化,用降水量和蒸散量之间的差值与其平均状态的偏离程度来揭示区域的干旱特征<sup>[19,21]</sup>。正的SPEI表示水分盈余,负的SPEI表示水分亏缺。根据气象干旱等级标准<sup>[22]</sup>,并结合研究区的相关研究,将SPEI<-1视为干旱年<sup>[19,21-22]</sup>。

### 1.3 方法

1.3.1 趋势分析 采用一元线性回归方法分析吴起县植被的NDVI和气候变化在时间尺度上的变化特征。以年份为自变量,NDVI和气候变量为因变量构建线性回归模型,利用斜率来量化年际变化趋势,同时采用 $t$ 检验进行显著性检验,公式如下。

$$k = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times X_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n X_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2}, \quad (1)$$

式中, $n$ 为研究时间长度; $X_i$ 为第 $i$ 年的NDVI值; $k$ 为回归斜率, $k>0$ 表明NDVI处于增加趋势,反之为减少趋势。结合NDVI的变化趋势和 $t$ 检验( $p=0.05$ ),进行显著性检验。

1.3.2 相关性分析 利用Spearman相关性分析,分析NDVI与降水、气温和SPEI之间的关系,从而揭示了植被生长对气候变化的敏感性。相关系数越大,表明两者之间的关系越密切。例如,NDVI与SPEI呈正相关表明植被在这些区域受到缺水的限制,即植被对于干旱敏感,正相关性系数越高表明植被对于干旱的敏感性越高;而负相关的区域表明植被对于干旱不敏感。

## 2 结果与分析

### 2.1 植被NDVI时空变化趋势

2.1.1 时间变化 2001—2020年吴起县植被NDVI呈显著增加的趋势,增速为0.059/10 a( $p<0.01$ ;图1a)。吴起县植被NDVI由2001年的0.17增长至2020年的0.37,年际增幅较大。从不同土地类型来看,吴起县森林和农田的NDVI均呈显著增加的趋势,但森林(0.078/10 a)增速大于农田(0.059/10 a) ( $p<0.01$ ;图1b)。

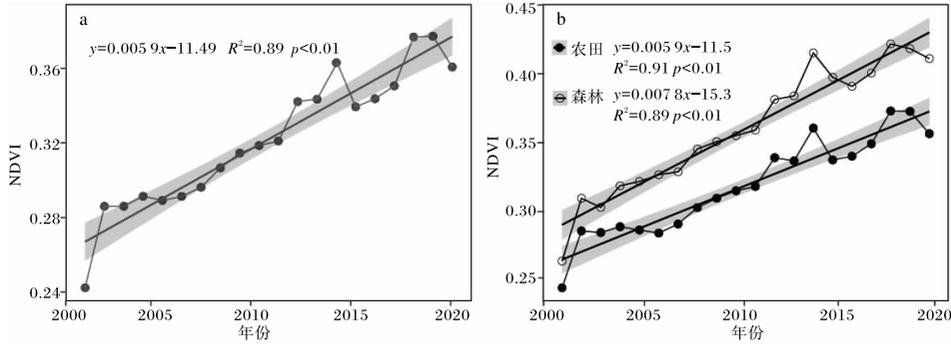


图 1 2001—2020 年吴起县植被(a)、农田和森林(b)NDVI 的 年际变化特征

2.1.2 空间变化 从空间分布来看,2001—2020 年吴起县植被的 NDVI 总体呈显著增加趋势, 98.06%的区域通过了显著性检验。然而,NDVI 变化趋势具有很大的空间异质性,其中南部地区的增加趋势高于北部地区(图 2)。这与该县近 20 a 实施的退耕还林还草等措施密切相关<sup>[1,19-20]</sup>。

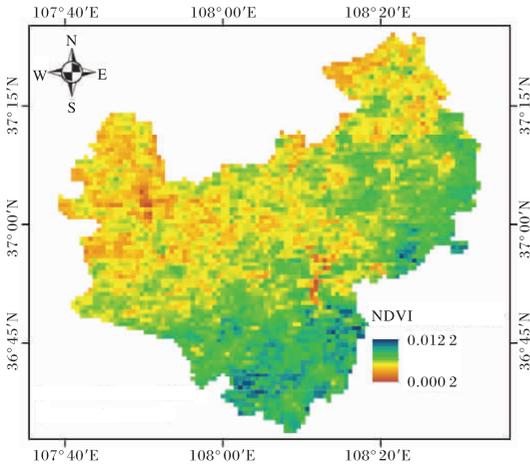


图 2 2001—2020 年吴起县植被 NDVI 变化趋势的 空间分布

### 2.2 气候变化趋势

1970—2020 年吴起县年均气温呈显著上升 趋势( $p < 0.01$ ;图 3a),其增速为  $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。近 50 a 吴起县的降水量呈增加趋势,增速为  $1.15\text{ mm}$

$/10\text{ a}$ 。但是由于降水量年际波动较大,研究区降 水增加趋势不显著( $p > 0.05$ ;图 3b)。基于 SPEI 的时间变化发现,近 50 a 该县共发生了 11 次干 旱事件,分别为 1972 年、1974 年、1982 年、1987 年、1991 年、1997 年、1999—2000 年、2004—2005 年、2008 年、2010 年和 2015 年(图 3c)。虽然近 20 a 降水量和温度年际波动较大,降水增加和温 度降低趋势不明显( $p > 0.05$ )。但 2000—2020 年累积发生了 5 次干旱事件,干旱累积发生次数 明显大于 1970—1999 年。总的来说,吴起县近 50 a 来存在气温上升、降水波动以及干旱频发 的趋势,气候变异性增加。

### 2.3 植被 NDVI 对气候变化的响应

从年际尺度来看,NDVI 与同期气温呈负相 关关系,与降水和 SPEI 呈正相关关系,但不显著 ( $p > 0.05$ ,图 4),这表明近 20 a 吴起县 NDVI 对 同期气候变化的响应不是特别强烈。造成这种结 果的原因:一方面与研究的时间尺度相关<sup>[24]</sup>,同 时气候因素对植被的影响可能不是线性的,通常 呈复杂的非线性过程<sup>[23,24]</sup>;另一方面,不同地区 的植被对气候因素的响应可能不同,整体上没有 显著相关性可能是因为不同地区的异质性抵消了 局部的相关性<sup>[24,25]</sup>。

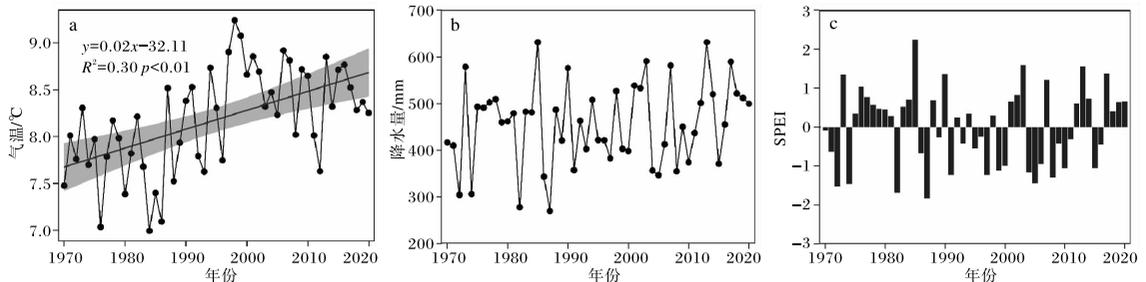


图 3 1970—2020 年吴起县气温(a)、降水量(b)和 SPEI(c)的 年际变化

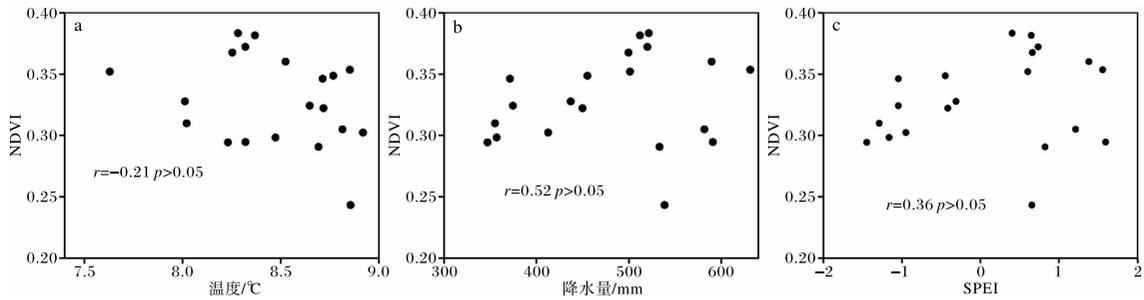


图4 吴起县植被 NDVI 与气温(a)、降水量(b)和 SPEI(c)的相关关系

在空间尺度上来看,吴起县植被 NDVI 与气温呈正相关的像元占区域植被像元总数的 34.33%,主要分布在西部(图 5a);与气温呈负相关的像元数占总像元的 65.67%,主要分布在东北和南部区域(图 5a)。吴起县植被 NDVI 与降水和 SPEI 整体上均呈正相关(>97%)(图 5b、图

5c),表明吴起县整个区域对于干旱非常敏感,其中敏感性最大的区域主要分布在西北部和东北部。森林和农田的 NDVI 与气温无显著的相关关系(图 6a)。森林的 NDVI 与降水和 SPEI 的相关系数均显著低于农田,这表明森林对于干旱的敏感性低于农田(图 6b、图 6c)。

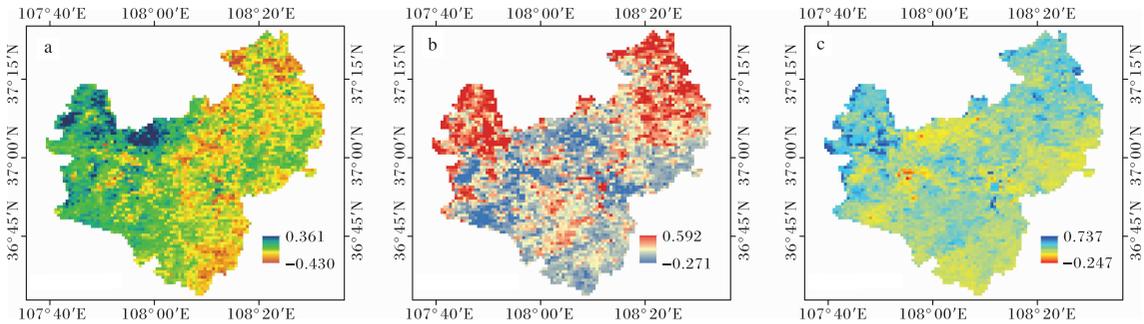


图5 吴起县植被 NDVI 与气温(a)、降水量(b)、和 SPEI(c)相关系数的空间分布

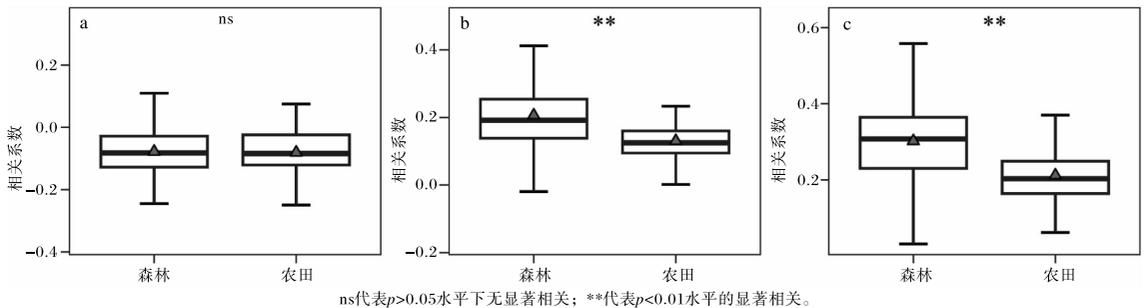


图6 吴起县农田和森林的 NDVI 与气温(a)、降水量(b)、和 SPEI(c)的相关系数

### 3 结论与讨论

(1) 2001—2020 年吴起县植被 NDVI 以 0.059/10 a 的速率显著增加,森林的增速显著高于农田。

(2) 在区域尺度上,2001—2020 年吴起县植被 NDVI 总体呈显著增加趋势,南部的增加趋势大于北部。98%以上区域的 NDVI 与 SPEI 呈正相关,相关性最高的区域主要分布在西北部和东

北部,这些地区的 NDVI 较低,对于干旱的敏感性较高。相比之下,南部地区的 NDVI 与 SPEI 相关系数最低,该区域水分条件优于北部,导致其对降水和干旱的敏感性较低,这也表明该区域更适宜植被覆盖。NDVI 对气候变化的异质性表明,植被恢复应充分考虑区域环境特征与植被特性,做到因地制宜。

(3) 不同土地类型的差异性显示,森林对于干旱

的抵抗力较高,这与其生态系统特性密切相关<sup>[18,26]</sup>。吴起县南部植被覆盖的显著增加可能在一定程度上提高了植被的抗旱能力,表明植树造林等生态措施有助于提升生态系统的水分调节和抵抗干旱的能力<sup>[20,26]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] 罗舒元,朱清科,辛云玲,等. 陕北吴起县植被覆盖度时空特征及其影响机制[J]. 中国水土保持科学, 2020,18(3):146-154.
- [2] 许智超,张岩,刘宪春,等. 半干旱黄土区退耕还林十年植被恢复变化分析:以陕西吴起县为例[J]. 生态环境学报, 2011, 20(1):91-96
- [3] 李登科. 陕北吴起县退耕还林(草)成效的遥感监测分析[J]. 中国沙漠, 2009, 29(1):125-130.
- [4] 沈瑞昌,吴秀芹,朱清科. 黄土区适宜性植物群落优化配置:以陕西省延安市吴起县为例[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(4):150-155.
- [5] 王娟,何慧娟. 吴起县 2000—2013 年植被 NPP 变化特征[J]. 陕西气象, 2015(6):6-9.
- [6] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等. 黄土高原生态工程的生态成效[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(1):11-19.
- [7] 马少薇,郭建英,蓝登明,等. 吴起县不同退耕还林地群落恢复特征研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(6):204-209.
- [8] 姚文俊,张岩,朱清科. 小流域林地空间分布对土壤侵蚀的影响:以陕北吴起县为例[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(1):16-22.
- [9] 林隆超,王晓飞,刘延平,等. 退耕还林工程背景下延安植被覆盖时空变化及其对气候的响应[J]. 陕西气象, 2022(4):1-6.
- [10] 党小虎,吴彦斌,刘国彬,等. 生态建设 15 年黄土高原生态足迹时空变化[J]. 地理研究, 2018, 37(4):761-771.
- [11] 马浩. 陕西退耕还林低效生态林提质增效研究[J]. 林业建设, 2021(4):45-49.
- [12] 杨志福. 黄土丘陵干旱区低效人工林更新改造技术[J]. 农技服务, 2015, 32(6):146.
- [13] 傅伯杰,刘彦随,曹智,等. 黄土高原生态保护和高质量发展现状、问题与建议[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(8):1110-1117.
- [14] 杨磊,张子豪,李宗善. 黄土高原植被建设与土壤干燥化:问题与展望[J]. 生态学报, 2019, 39(20):7382-7388.
- [15] 邵明安,贾小旭,王云强,等. 黄土高原土壤干层研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2016, 31(1):14-22.
- [16] 樊莉莉,耿斌,王吉林,等. 2001—2020 年黄土高原干旱时空动态及其对气候变化的响应[J]. 水土保持研究, 2022, 29(6):183-191.
- [17] 苏文壮,杨永崇,王涛,等. 近 20 年黄土高原干旱变化特征及其影响因素[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(11):4551-4560.
- [18] 刘哲琼,余敦先,夏军,等. 黄土高原地区气象干旱动态格局演变及其对植被的影响[J]. 地理科学, 2023, 43(9):1659-1671.
- [19] 侯青青,裴婷婷,陈英,等. 1986—2019 年黄土高原干旱变化特征及趋势[J]. 应用生态学报, 2021, 32(2):649-660.
- [20] 张芳宁,杨亮洁,杨永春. 1981—2016 年黄土高原植被 NDVI 变化及对气候和人类活动的响应[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2):230-237.
- [21] 张永瑞,张岳军,靳泽辉,等. 基于 SPEI 指数的黄土高原夏季干旱时空特征分析[J]. 生态环境学报, 2019,28(7):1322-1331.
- [22] 中国气象局. 气象干旱等级:GB/T 20481-2017 [S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- [23] 刘静,温仲明,刚成诚. 黄土高原不同植被覆盖类型 NDVI 对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(2): 678-691.
- [24] 徐丽萍. 黄土高原地区植被恢复对气候的影响及其互动效应[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2008.
- [25] 王凯利,王志慧,肖培青,等. 基于水量平衡原理的黄土高原林草植被覆盖度恢复潜力评估[J]. 生态学报, 2022, 42(20):8352-8364.
- [26] 徐知远,胡振宏,马龙龙,等. 陕北地区退耕还林近 20 年三种类型人工林对干旱的响应:以吴起县为例[J]. 陕西气象, 2022(2): 39-44.